

ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1374>

Функциональная магнитно-резонансная томография в состоянии покоя: анализ коннективности крупномасштабных сетей головного мозга

© Абдулаев Ш.К.^{1*}, Тарумов Д.А.¹, Богдановская А.С.²

¹ ФГБОУ ВО “Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова” Министерства обороны Российской Федерации; 194044 Санкт-Петербург, улица Академика Лебедева, 6, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО “Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова” Минздрава России; 191015 Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41, Российская Федерация

Цель исследования: оценить возможности различных методов анализа функциональной интеграции крупномасштабных нейросетей головного мозга у здоровых испытуемых по данным функциональной МРТ в состоянии покоя.

Материал и методы. Функциональная МРТ в состоянии покоя выполнена 28 здоровым испытуемым мужского пола в возрасте $27,4 \pm 5,1$ года, без вредных привычек и черепно-мозговых травм. Проводилась функциональная оценка крупномасштабных нейросетей, входящих в тройную сетевую модель: сети пассивного режима работы, сети выявления значимости и сети исполнительного контроля.

Результаты. Анализ независимых компонентов в полной мере позволил выявить сеть пассивного режима работы и сеть выявления значимости, однако сеть исполнительного контроля была выявлена частично, и в основном это касалось структур, имеющих билатеральное расположение. Анализ графов определил структуры, имеющие наибольшую ценность для нейрофункциональных исследований. Практически все структуры, у которых отмечены максимальные показатели графов, относятся к сети исполнительного контроля. Результаты ROI-анализа показали взаимодействие между собой сети пассивного режима и сети исполнительного контроля, что свидетельствует об их совместной работе в обеспечении важных функций головного мозга. Также было определено, что у здоровых людей все структуры внутри крупномасштабных сетей функционально связаны между собой.

Заключение. Разные методы анализа данных функциональной МРТ в состоянии покоя выявляют различные аспекты связности в мозге, в обработке каждого метода задействованы совершенно разные принципы, а окончательные параметры количественного определения также меняются в зависимости от предпочтительного метода. В настоящее время не существует единого метода, который сам по себе считался бы стандартом анализа. Применение нескольких методов к одному и тому же набору данных может дать более информативные результаты.

Ключевые слова: функциональная МРТ в состоянии покоя; функциональная интеграция; нейросети

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Абдулаев Ш.К., Тарумов Д.А., Богдановская А.С. Функциональная магнитно-резонансная томография в состоянии покоя: анализ коннективности крупномасштабных сетей головного мозга. *Медицинская визуализация*. 2024; 28 (1): 45–56. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1374>

Поступила в редакцию: 18.06.2023.

Принята к печати: 16.11.2023.

Опубликована online: 26.12.2023.

Resting state functional magnetic resonance imaging: an analysis of the connectivity of brain large-scale networks

© Shamil K. Abdulaev^{1*}, Dmitriy A. Tarumov¹, Anna S. Bogdanovskaya²



¹ S.M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia; 6, Academician Lebedev str., St. Petersburg 194044, Russian Federation

² I.I. Mechnikov NorthWestern State Medical University; 41, Kirochnaya str., 191015 St. Petersburg, Russian Federation

Objective: to assess the possibilities of various methods for analyzing the functional integration of large-scale brain neural networks in healthy subjects according to functional MRI resting state.

Material and methods. Functional MRI at rest was performed on 28 healthy male subjects aged 27.4 ± 5.1 years, without bad habits and craniocerebral injuries. A functional evaluation of large-scale neural networks included in the triple network model was carried out: default mode network, salience network, executive control network.

Results. The analysis of independent components made it possible to fully identify the default mode network and the salience network, however, the executive control network were partially identified, and this mainly concerned structures with a bilateral location. Graph analysis has identified structures of greatest value for neurofunctional research. Almost all structures that have the highest graph indicators are related to the executive control network. The results of the Roi-analysis showed the interaction between all large-scale networks, which indicates their joint work in providing important brain functions. It was also determined that in healthy people, all structures within large-scale networks are functionally interconnected.

Conclusion. Different methods of resting functional MRI data analysis reveal different aspects of connectivity in the brain, completely different principles are involved in the processing of each method, and the final quantification parameters also vary depending on the preferred method. Currently, there is no single method that in itself would be considered the standard of analysis. Applying multiple methods to the same dataset can produce more informative results.

Keywords: functional MRI resting state; functional integration; networks

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Abdulaev Sh.K., Tarumov D.A., Bogdanovskaya A.S. Resting state functional magnetic resonance imaging: an analysis of the connectivity of brain large-scale networks. *Medical Visualization*. 2024; 28 (1): 45–56. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1374>

Received: 18.06.2023.

Accepted for publication: 16.11.2023.

Published online: 26.12.2023.

Введение

Мозг контролирует все сложные функции в организме человека. Структурно мозг в целом разделен на различные области, специализирующиеся на обработке и передаче нервных сигналов. Работая сообща, эти узкоспециализированные области управляют сложными функциями и определяют поведение человека.

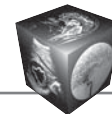
Исследования по моделированию человеческого мозга как сложной системы значительно расширились, поскольку нейробиологи стремятся понять механизмы, лежащие в основе познания, поведения и восприятия [1–4].

Анализ коннектомы головного мозга человека с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) начался в середине 1990-х годов и привлек большое внимание возможностью обнаружения нейронных основ психики и психических расстройств. фМРТ в состоянии покоя вошла в клиническую сферу после исследований В. Biswal по изучению функций моторной коры. Было установлено, что сигналы в состоянии покоя представляют собой последовательные низкочастотные колебания в диапазоне 0,01–0,08 Гц [5]. Методика фМРТ в состоянии покоя (rs-fMRI) имеет преимущества перед другими видами фМРТ благодаря простоте получения сигнала и необхо-

димости минимальных усилий со стороны пациентов [6]. Отсутствие стимульного материала делает фМРТ в состоянии покоя особенно важным для пациентов, у которых могут возникнуть трудности при выполнении задач или тестов.

Тем не менее программный анализ фМРТ в состоянии покоя является сложной задачей из-за огромного количества данных и необходимости сложного анализа. Прежде чем применять какой-либо из аналитических методов, важными этапами предварительной обработки являются перестройка и удаление искажающих артефактов (например, движения головы, сигнала цереброспинальной жидкости (ЦСЖ)).

Правильная интерпретация результатов фМРТ в состоянии покоя требует значительного уровня знаний в анатомии, патофизиологии и нейрофизиологии головного мозга. Аналитические подходы можно условно разделить на 2 типа: функциональную сегрегацию и функциональную интеграцию [7, 8]. Методы оценки функциональной сегрегации направлены на анализ активности сетей, тогда как методы оценки функциональной интеграции – на анализ связности нейросетей головного мозга. Однако поскольку мозг более правильно изучать как интегрированную сеть, а не изолированные кластеры, интерес к методам



оценки функциональной сегрегации постепенно уступает первенство методам оценки функциональной интеграции.

Связность может быть результатом прямого анатомического или непрямого соединения через промежуточную область или даже не иметь анатомических путей [9]. Функциональная связность – это связь между пространственными областями, установленная с помощью линейной временной корреляции между параметрами активности нейронов. Функциональная интеграция является основой передачи информации между различными областями мозга [8, 10]. Для оценки работы функциональной интеграции обычно используются такие методы, как анализ функциональной связности на основе зон интереса (ROI-анализ), анализ независимых компонентов (ICA) и анализ графов.

ROI-анализ был первым методом, принятым B. Biswal и соавт. для определения сетей в состоянии покоя [11]. По сути, анализ на основе зон интереса – это метод, основанный на модели, в которой мы можем выбрать интересующую область (ROI) и найти линейную корреляцию активности этой исходной области со всеми другими вокселями во всем мозге, тем самым получая карту функциональных связей. Сочетание активации между различными областями мозга указывает на то, что они вовлечены в один и тот же основной функциональный процесс и, таким образом, интерпретируются как функционально связанные. Эти области мозга могут не быть напрямую связаны нервными волокнами. Простота, легкая интерпретация и прямолинейность этого метода делают его наиболее предпочтительным методом анализа для оценки функциональных связей [12, 13].

ROI-анализ требует изначального определения зоны интереса, которое часто основано на гипотезах. Однако при изменении исходной области результаты анализа функциональной связности также будут меняться. Таким образом, недостатком ROI-анализа является его зависимость от выбора области головного мозга.

Анализ независимых компонентов способствует эффективному извлечению отдельных сетей за счет использования математических алгоритмов для разложения сигнала от вокселей всего мозга на пространственно- и временно независимые компоненты [14, 15]. Каждая функциональная сеть (компонент) представляет собой независимую сеть нейронов с синхронизированной BOLD-активностью. Средний показатель “z” для каждой сети указывает на степень функциональной связности внутри сети. В отличие от ROI-анализа, который определяет функциональные связи областей, связанных с зоной интереса, анализ незави-

симых компонентов извлекает все обнаруживаемые сети головного мозга.

Анализ независимых компонентов представляет мозговые сети одну за другой и не показывает связи между областями или между различными сетями мозга [16]. Дополнительные проблемы заключаются в том, что одна сеть может быть разбита на подсети в зависимости от количества указанных независимых компонентов. Кроме того, поиск оптимального количества независимых компонентов является спорным, поскольку выбор небольшого количества компонентов может оказать значительное влияние на результаты [17]. При анализе данных многое зависит и от умения исследователя идентифицировать компоненты сети.

Недавние достижения в области методов нейровизуализации в сочетании с теоретико-графовыми подходами открыли новые возможности для изучения нейронных механизмов, лежащих в основе человеческого познания и поведения, с точки зрения межрегиональных взаимодействий мозга [18, 19]. Сетевой анализ на основе теории графов позволяет получить значимую информацию о топологической архитектуре сетей человеческого мозга, например о малом мире, модульной организации и тесно связанных или централизованных узлах [20, 21]. “Малый мир” – это свойство сетей, характерное для человеческого мозга, в которых большинство узлов не являются соседями друг другу, но до них можно добраться из любого другого узла за небольшое количество шагов [22]. Недавние исследования показывают, что свойство “малого мира” сетей мозга претерпевает топологические изменения при различных неврологических и психических расстройствах [23, 24]. Однако стоит отметить, что результаты теории графов трудны для интерпретации, в связи с чем данный метод не пользуется популярностью среди исследователей.

Цель исследования: оценить возможности различных методов анализа функциональной интеграции крупномасштабных сетей головного мозга у здоровых испытуемых по данным фМРТ в состоянии покоя.

Материал и методы

Исследование проведено на кафедре рентгенологии и радиологии Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова. Обследовано 28 здоровых испытуемых мужского пола в возрасте $27,4 \pm 5,1$ года, без вредных привычек, черепно-мозговых травм, не употреблявших никаких лекарственных средств за последний месяц. Все испытуемые были проинформированы о проводимом исследовании в достаточной степени и подписали



информированное добровольное согласие. Исследование соответствовало всем положениям Хельсинкской декларации и было одобрено местным этическим комитетом.

фМРТ выполнялась на магнитно-резонансном томографе Philips Ingenia с силой индукции магнитного поля 1,5 Тл с использованием последовательности BOLD со следующими параметрами: TR – 3000 мс, TE – 50 мс, FA – 90°, FOV – 250 мм, разрешение матрицы – 128×128 пикселей, толщина среза – 4,0 мм; продолжительность 5 мин 40 с.

При сканировании пациенту давались указания не совершать даже самых минимальных движений и стараться не интенсифицировать и не актуализировать внутреннюю мыслительную деятельность, т.е. находиться в состоянии максимального “когнитивного расслабления”. При выполнении последовательностей фМРТ покоя пациент лежал в состоянии физического покоя без предъявления каких-либо зрительных стимулов.

Далее выполняли предобработку полученных данных с помощью статистического нейровизуализационного пакета CONN 21 (Functional Connectivity Toolbox). Целью предварительной обработки являлось максимальное устранение посторонних шумов и сигналов, которые накладываются на BOLD-сигнал, связанных с неоднородностью магнитного поля, физиологическими (дыхание и сердцебиение) и двигательными (движение головы, пульсация крупных артерий, ликвора) артефактами.

Стадия предобработки включала в себя несколько стадий, основные из которых:

1. Коррекция движения – применяется для выравнивания функциональных данных, где все сканы пересчитываются в эталонное изображение [25]. Эта процедура направлена на уменьшение влияния произвольных и непроизвольных движений головы на сигнал.

2. Коррекция изображений по времени – применяется для коррекции временной разницы между различными срезами за период сбора функциональных данных [26].

3. Идентификация выброса – направлена на удаление из массива данных колебаний сигнала во времени, предположительно связанных со структурированными шумами (например, движение головы, пульсация ЦСЖ).

4. Сегментация – используется для сегментации функциональных и анатомических данных на серое вещество, белое вещество и спинномозговую жидкость.

5. Пространственная нормализация – необходима для приведения функциональных и структурных данных в систему координат Монреальского неврологического института (MNI, англ.: Montreal

Neurological Institute). Для любой зоны активации определяются координаты, которые можно использовать для сравнения по группам испытуемых [27].

6. Функциональное (гауссовское) сглаживание – применяется, чтобы увеличить отношение сигнал/шум и уменьшить вариативность данных [28].

При применении анализа независимых компонентов визуально определялись интересующие сети в компонентах, что требует от исследователя знания структур, входящих в те или иные сети. После отбора необходимых независимых компонентов оценивались показатели: пиковое значение сигнала и частота временных рядов независимого компонента.

После анализа независимых компонентов оценивалась групповая корреляция на основе выбора зон интереса – ROI-анализ. С помощью анатомического атласа Harvard–Oxford, адаптированного для фМРТ, определялись зоны интереса. Для обработки данных был применен метод функционального сетевого подключения [29], в основе которого лежит параметрический анализ. На основе получаемых данных моделировалось графическое отображение функциональных связей между структурами головного мозга в виде коннектома и в формате 3D с указанием корреляции и интенсивности их связности между собой.

Последним этапом проводилась оценка коннективности теорией графов. CONN 21a позволял вычислить следующие показатели: локальную и глобальную эффективность, среднюю длину пути, степень узла, коэффициент кластеризации и центральность узла. Глобальная эффективность и средняя длина пути указывают на интеграцию мозговых сетей. Локальная эффективность, коэффициент кластеризации и центральность дают представление о сегрегированной активности сетей. Центральность определяет ведущую роль узла в распространении информации в другие узлы в сети.

Проводилась функциональная оценка крупномасштабных нейросетей, входящих в тройную сетевую модель: сети пассивного режима работы (син. дефолтная сеть, или сеть по умолчанию, СПРР, DMN), сети выявления значимости (син. салиентная сеть, СВЗ, SN) и сети исполнительного контроля (син. фронтопарietальная сеть, СИК, CEN) [30, 31]. СПРР включает в себя медиальную префронтальную кору, заднюю поясную кору и нижние отделы теменной доли с двух сторон; СВЗ – переднюю поясную кору и островковые доли с двух сторон; СИК – дорсолатеральную префронтальную кору и заднюю теменную кору, расположенные билатерально [32–35]. Данные сети играют важную

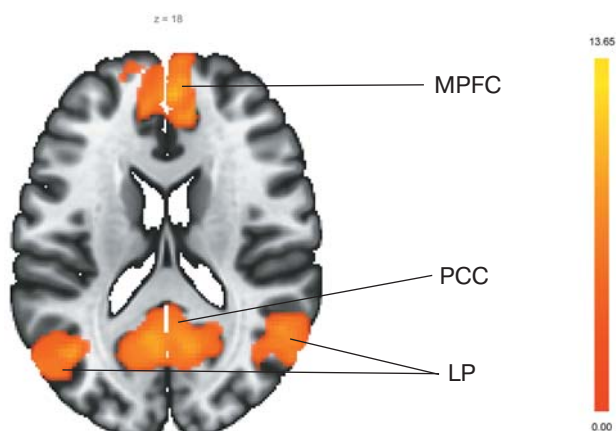
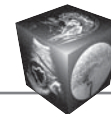


Рис. 1. Анализ независимых компонентов: сеть пассивного режима работы. MPFC – медиальная префронтальная кора, PCC – задняя поясная кора, LP – нижняя теменная доля.

Fig. 1. Independent components of analysis: default mode network. MPFC – medial prefrontal cortex, PCC – posterior cingulate cortex, LP – lateral parietal cortex.

роль в функционировании головного мозга, и исследование их коннективности представляет большой интерес в современных исследованиях [36].

Результаты анализа на основе зон интереса представлялись в виде значений beta и T. Значение beta –представляет величину эффекта, т.е. средние значения корреляции (*Примечание:* в данной работе выбрана двумерная корреляция), преобразованные Фишером, в исследуемой группе, T-значение – статистика (одновыборочный t-тест, для сравнения среднего значения эффекта (beta) в выборке с 0). Значения коэффициентов корреляции при анализе графов преобразовывались в z-баллы (т.е. основанное на единичном нормальном распределении со средним, равным 0, и стандартным отклонением, равным 1). Beta и z-баллы являются безразмерными величинами, и в работе представлены в условных единицах. Уровень статистической значимости для всех методов анализа не превышал порог $p = 0,05$.

Результаты

Анализ независимых компонентов позволил выявить крупномасштабные сети тройной сетевой модели, однако не все сети были выявлены в полном объеме. Все структуры в независимом компоненте были выявлены у СПРР: медиальная префронтальная кора, задняя поясная кора, нижние височные доли с двух сторон, и у СВЗ: передняя поясная кора и островок с двух сторон (рис. 1, 2). Степень функциональной связности СПРР доходила до 13,65 усл. ед., а у СВЗ – до 24,64 усл. ед. ($p < 0,005$).

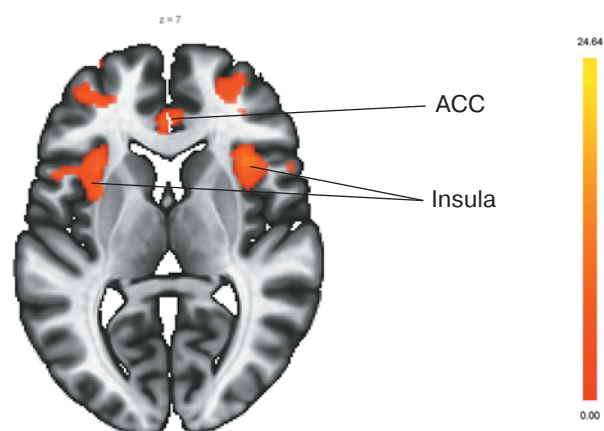


Рис. 2. Анализ независимых компонентов: сеть выявления значимости. ACC – передняя поясная кора, Insula – островок.

Fig. 2. Independent components of analysis: salience network. ACC – anterior cingulate cortex.

Структуры СИК при анализе независимых компонентов определялись только в левом полушарии: задняя теменная кора и дорсолатеральная префронтальная кора (рис. 3). В этих же структурах с противоположной стороны функциональные связи отсутствовали. В других компонентах сигнал от структур СИК был еще слабее или вовсе отсутствовал. Степень коннективности СИК доходила до 13,13 усл. ед. ($p < 0,005$). Частота временных рядов всех вышеописанных независимых компонентов составляла 0,05 Гц.



Рис. 3. Анализ независимых компонентов: сеть исполнительного контроля. PPC – задняя теменная кора, LPFC – дорсолатеральная префронтальная кора.

Fig. 3. Independent components of analysis: executive control network. PPC – posterior parietal cortex, LPFC – dorsolateral prefrontal cortex.



При реконструкции функциональных связей с использованием теории графов были получены следующие характеристики (табл. 1, рис. 4). Левая задняя теменная кора имела наибольшие значения глобальной эффективности, коэффициента кластеризации и степени узла, а правая задняя теменная кора – локальной эффективности. Высокие показатели центральности узла от-

мечены в правой дорсолатеральной префронтальной коре. Все структуры, у которых отмечены вышеперечисленные максимальные показатели графов, относятся к СИК. Несмотря на низкие показатели графов в остальных сетях, максимальные значения средней длины пути определялись в структуре СПРР – левой нижней теменной доле.

Таблица 1. Показатели графов крупномасштабных сетей покоя

Table 1. Graph indicators of large-scale rest networks

Сети покоя Rest network	Области головного мозга Brain structures	Глобальная эффективность Global effect	Локальная эффективность Local effect	Средняя длина пути Average path length	Степень узла Degree	Центральность Betweenness centrality	Коэффициент кластеризации Clustering coefficient
СПРР DMN	Медиальная префронтальная кора Medial prefrontal cortex	10.42	7.10	16.46	7.30	3.30	6.65
	Задняя поясная кора posterior cingulate cortex	17.10	12.15	15.35	9.29	2.50	10.71
	Левая нижняя теменная доля Parietal lobule left	20.32	15.68	28.55	13.89	3.14	11.79
	Правая нижняя теменная доля Parietal lobule right	22.26	14.14	16.62	12.45	2.74	11.74
	Передняя поясная кора Anterior cingulate cortex	20.55	6.19	16.51	13.60	2.54	5.88
СВЗ SN	Левый островок Insula left	12.71	7.95	13.58	8.68	2.65	7.05
	Правый островок Insula right	13.51	10.60	13.40	10.80	2.54	9.56
	Левая задняя теменная кора Posterior parietal cortex left	27.64	15.21	17.53	19.15	–	12.12
СИК CEN	Правая задняя теменная кора Posterior parietal cortex right	23.40	20.51	14.69	14.25	3.12	11.83
	Левая дорсолатеральная префронтальная кора Dorsolateral prefrontal cortex left	26.07	10.53	16.82	12.66	3.20	9.28
	Правая дорсолатеральная префронтальная кора Dorsolateral prefrontal cortex right	26.57	10.44	18.15	13.08	3.56	7.97

Примечание. $p < 0,05$. Полужирным шрифтом выделены максимальные значения.

Note. $p < 0.05$. The maximum values are highlighted in bold.

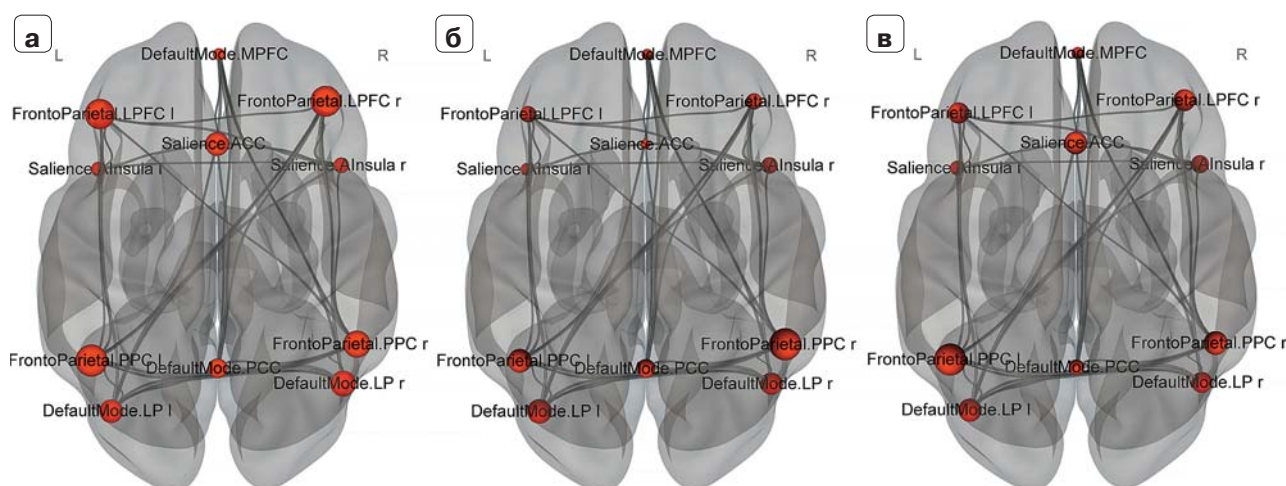
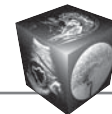


Рис. 4. Анализ графов крупномасштабных сетей покоя. **а** – глобальная эффективность; **б** – локальная эффективность; **в** – степень узла. Default Mode – сеть пассивного режима работы, Salience – сеть выявления значимости, FrontoParietal – сеть исполнительного контроля, MPFC – медиальная префронтальная кора, PCC – задняя поясная кора, ACC – передняя поясная кора, AInsula – островок, PPC – задняя теменная кора, LPFC – дорсолатеральная префронтальная кора, r (right) – правая сторона, l (left) – левая сторона.

Fig. 4. Graph analysis of large-scale rest networks. **a** – global efficiency; **b** – local efficiency; **v** – degree. Default Mode – default mode network, Salience – Salience network, FrontoParietal – executive control network, MPFC – medial prefrontal cortex, PCC – posterior cingulate cortex, ACC – anterior cingulate cortex, AInsula – insula, PPC – posterior parietal cortex, LPFC – dorsolateral prefrontal cortex, r – right, l – left.

С помощью анализа на основе зон интереса были проанализированы функциональные связи между структурами, входящими в состав крупномасштабных сетей головного мозга. По результатам ROI-анализа достоверных межсетевых связей между СВЗ-СПРР и СВЗ-СИК не выявлено ($p > 0,05$). Внутрисетевые связи в СВЗ отмечались между всеми структурами сети, при этом сила связей наиболее выражена между островками обоих по-

лушарий, чем этих же структур с передней поясной корой (рис. 5).

Далее производилась оценка функциональной коннективности между сетью пассивного режима работы и сетью исполнительного контроля. Структуры данных сетей, расположенные в теменных долях, имели функциональные связи между собой, а интенсивность связей была более выражена в пределах одного полушария. Кроме того,

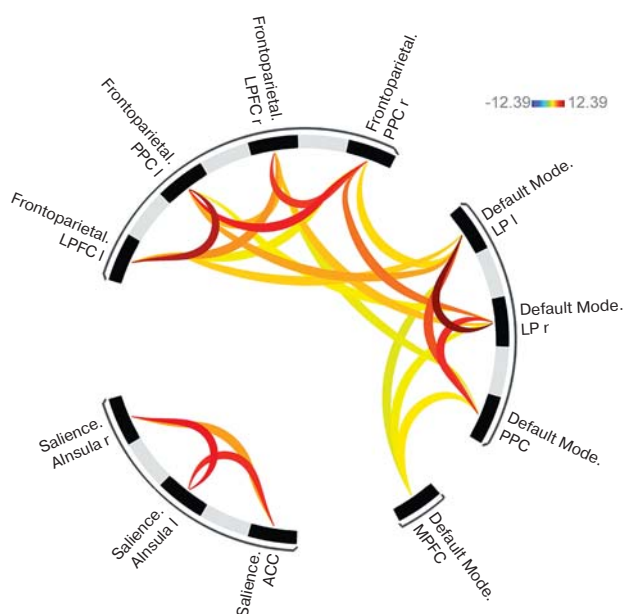


Рис. 5. Коннектомическое изображение функциональных связей между структурами крупномасштабных сетей покоя головного мозга.

Default Mode – сеть пассивного режима работы, Salience – сеть выявления значимости, FrontoParietal – сеть исполнительного контроля, MPFC – медиальная префронтальная кора, PCC – задняя поясная кора, LP – нижняя теменная доля, ACC – передняя поясная кора, AInsula – островок, PPC – задняя теменная кора, LPFC – дорсолатеральная префронтальная кора, r (right) – правая сторона, l (left) – левая сторона.

Fig. 5. Connectome of functional connections between the structures of large-scale rest networks of the brain. Default Mode – default mode network, Salience – Salience network, FrontoParietal – executive control network, MPFC – medial prefrontal cortex, PCC – posterior cingulate cortex, LP – parietal lobule, ACC – anterior cingulate cortex, AInsula – insula, PPC – posterior parietal cortex, LPFC – dorsolateral prefrontal cortex, r – right, l – left.



Таблица 2. Функциональные связи между структурами сети пассивного режима работы и сети исполнительного контроля головного мозга

Table 2. Functional connections between the structures of the default mode network and the executive control network

Зоны интереса сети пассивного режима работы и сети исполнительного контроля Region of interest the default mode network and the executive control network	Beta	T	p
Правая нижняя теменная доля – Левая задняя теменная кора Parietal lobule right – Posterior parietal cortex left	0.13	3.09	0.009
Правая нижняя теменная доля – Правая дорсолатеральная префронтальная кора Parietal lobule right – Dorsolateral prefrontal cortex right	0.23	4.74	<0.001
Правая нижняя теменная доля – Правая задняя теменная кора Parietal lobule right – Posterior parietal cortex right	0.29	6.28	<0.001
Левая нижняя теменная доля – Левая задняя теменная кора Parietal lobule left – Posterior parietal cortex left	0.36	5.37	<0.001
Левая нижняя теменная доля – Правая задняя теменная кора Parietal lobule left – Posterior parietal cortex right	0.22	4.16	<0.001
Левая нижняя теменная доля – Левая дорсолатеральная префронтальная кора Parietal lobule left – Dorsolateral prefrontal cortex left	0.33	4.42	<0.001
Задняя поясная кора – Правая дорсолатеральная префронтальная кора Posterior cingulate cortex – Dorsolateral prefrontal cortex right	0.13	2.75	0.017

Примечание. beta – величина эффекта, T – t-статистика, p – уровень значимости.

Note. Beta – effect size, T – t-statistic, p – value.

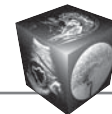
в пределах своего полушария выявлена коннективность нижней теменной доли (СПРР) с дорсолатеральной префронтальной корой (СИК). Также отмечена связь между задней поясной корой (СПРР) и правой дорсолатеральной префронтальной корой (СИК). Статистически значимых связей медиальной префронтальной коры (СПРР) со структурами СИК не обнаружено ($p > 0,05$). При внутрисетевом анализе СПРР и СИК функциональные связи выявлены у всех структур. Все связи как внутри сетей, так и между ними имели положительную корреляцию (табл. 2). Коннектометрическое изображение функциональных связей представлено на рис. 5.

Обсуждение

Наши результаты показали, что методы оценки функциональной интеграции фМРТ в состоянии покоя позволяют выявить функциональные связи между сетями покоя. Анализ независимых компонентов в полной мере позволил выявить сеть пассивного режима работы и сеть выявления значимости, однако сеть исполнительного контроля была выявлена частично, и в основном это касалось структур, имеющих билатеральное располо-

жение. Частота сигнала всех исследованных компонентов соответствовала значениям, описанным в литературе от 0,01 и до 0,08 Гц.

Анализ графов определил структуры, имеющие наибольшую ценность для нейрофункциональных исследований. Высокий показатель глобальной эффективности левой задней теменной коры и низкий показатель средней длины пути правого островка указывают, что данные структуры способны в большей степени распространять информацию за пределами своей сети на глобальном уровне. Левая задняя теменная кора играет наибольшую роль в потоке информации в своей сети, о чем свидетельствуют значения коэффициента кластеризации и степени узла. Показатель локальной эффективности, значение которой оказалось максимальным у правой задней теменной коры, указывает на высокий уровень локальной связности. Нельзя установить, какие меры графов больше подходят для изучения нейросетей [37], но, учитывая сложную структуру человеческого мозга, алгоритмы, которые могут оценивать свойства “малого мира” сети мозга (коэффициент кластеризации и средняя длина пути), имеют наибольшее прогностическое значение [38].



Результаты ROI-анализа показали взаимодействие между собой СПРР и СИК, что свидетельствует об их совместной работе в обеспечении важных функций головного мозга. Однако не все структуры участвуют в функциональных связях, в особенности это касается медиальной префронтальной коры (СВЗ). Стоит отметить, что положительная корреляция СИК и СПРР, выявленная в нашем исследовании, не соответствует литературным данным, утверждающим об антикоррелированности этих сетей в норме [39].

Заключение

Нами была выполнена попытка сравнения различных методик обсчета и анализа нейрофункциональных данных, получаемых при фМРТ головного мозга в состоянии покоя здоровых обследуемых. Было показано, что фМРТ в состоянии покоя является перспективным методом нейровизуализации, который играет огромную роль в анализе характеристик функциональных связей мозга в норме и патологии. На сегодняшний день существует несколько различных подходов и методов анализа данных фМРТ в состоянии покоя, и количество доступных методов постоянно расширяется. Поскольку разные методы анализа выявляют различные аспекты связности в мозге, в обработке каждого метода задействованы совершенно разные принципы, а окончательные параметры количественного определения также меняются в зависимости от предпочтительного метода. В настоящее время не существует единого метода, который сам по себе считался бы стандартом анализа. Различные методы анализа дополняют друг друга и применение нескольких методов к одному и тому же набору данных может дать более информативные результаты. Лучшее понимание алгоритмов обработки данных фМРТ полезно для интерпретации общих и расходящихся результатов, описанных в научной литературе.

Участие авторов

Абдулаев Ш.К. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Тарумов Д.А. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Богдановская А.С. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, подготовка и редакти-

рование текста, ответственность за целостность всех частей статьи.

Authors' participation

Abdulaev Sh.K. – concept and design of the study, collection and analysis of data, statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Tarumov D.A. – concept and design of the study, collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Bogdanovskaya A.S. – concept and design of the study, collection and analysis of data, text preparation and editing, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Список литературы

1. Craddock R.C., Jbabdi S., Yan C.G. et al. Imaging human connectomes at the macroscale. *Nat Methods*. 2013; 10: 524–539. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2482>
2. Bergmann E., Gofman X., Kavushansky A., Kahn I. Individual Variability in Functional Connectivity Architecture of the Mouse Brain. *Commun. Biol.* 2020; 3: 738. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01472-5>
3. Park H.J., Friston K. Structural and functional brain networks: from connections to cognition. *Science*. 2013; 342: 1238411. <https://doi.org/10.1126/science.1238411>
4. Тарумов Д.А., Абдулаев Ш.К., Труфанов А.Г., Ушаков В.Л., Шамрей В.К., Железняк И.С., Ипатов В.В., Романов Г.Г., Ковалишин И.М. Возможности функциональной магнитно-резонансной томографии покоя в оценке функционального состояния головного мозга у пациентов, страдающих опиоидной наркоманией. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2018; 3 (63): 72–79.
5. Biswal B. Resting state fMRI: a personal history. *Neuroimage*. 2012; 62 (2): 938–944. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.01.090>
6. Soddu A., Vanhaudenhuyse A., Demertzi A. et al. Resting state activity in patients with disorders of consciousness. *Funct. Neurol.* 2011; 26: 37–43.
7. Liu Y., Gao J.H., Liotti M. et al. Temporal dissociation of parallel processing in the human subcortical outputs. *Nature*. 1999; 400: 364–367. <https://doi.org/10.1038/22547>
8. Tononi G., Sporns O., Edelman G.M. A measure for brain complexity: relating functional segregation and integration in the nervous system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1994; 91: 5033–5037 <https://doi.org/10.1073/pnas.91.11.5033>
9. Lanting C.P., de Kleine E., Langers D.R., van Dijk P. Unilateral tinnitus: changes in connectivity and response lateralization measured with fMRI. *PLoS One*. 2014; 9: 110704. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110704>
10. Friston K.J. Modalities, modes, and models in functional neuroimaging. *Science*. 2009; 326: 399–403. <https://doi.org/10.1126/science.1174521>
11. Biswal B., Yetkin F.Z., Haughton V.M., Hyde J.S. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain



- using echo-planar MRI. *Magn. Reson. Med.* 1995; 34: 537–541. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910340409>
12. Van den Heuvel M.P., Hulshoff Pol H.E. Exploring the brain network: a review on resting-state fMRI functional connectivity. *Eur. Neuropsychopharmacol.* 2010; 20: 519–534. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2010.03.008>
 13. Li K., Guo L., Nie J., Li G., Liu T. Review of methods for functional brain connectivity detection using fMRI. *Comput. Med. Imaging Graph.* 2009; 33: 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2008.10.011>
 14. Van de Ven V.G., Formisano E., Prvulovic D. Functional connectivity as revealed by spatial independent component analysis of fMRI measurements during rest. *Hum. Brain. Mapp.* 2004; 22: 165–178. <https://doi.org/10.1002/hbm.20022>
 15. Beckmann C.F., DeLuca M., Devlin J.T., Smith S.M. Investigations into resting-state connectivity using independent component analysis. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Bio. Sci.* 2005; 360 (1457): 1001–1013. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1634>
 16. Bertolero M.A., Yeo B.T., D'Esposito M. The modular and integrative functional architecture of the human brain. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2015; 112 (49): 6798–6807. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510619112>
 17. Ma L., Wang B., Chen X., Xiong J. Detecting functional connectivity in the resting brain: a comparison between ICA and CCA. *Magn. Reson. Imaging.* 2007; 25 (1): 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2006.09.032>
 18. Kriegeskorte N., Douglas P.K. Cognitive computational neuroscience. *Nat. Neurosci.* 2018; 21: 1148–1160. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0210-5>
 19. Petersen S.E., Sporns O. Brain networks and cognitive architectures. *Neuron.* 2015; 88 (1): 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.027>
 20. Bullmore E.T., Bassett D.S. Brain graphs: graphical models of the human brain connectome. *Annu. Rev. Clin. Psychol.* 2011; 7: 113–140. <https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-040510-143934>
 21. Van den Heuvel M.P., Sporns O. Network hubs in the human brain. *Trends Cogn. Sci.* 2013; 17 (12): 683–696. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.09>
 22. Watts D.J., Strogatz S.H. Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature.* 1998; 393 (6684): 440–442. <https://doi.org/10.1038/30918>
 23. Fleischer V., Radetz A., Ciolac D. et al. Graph theoretical framework of brain networks in multiple sclerosis: a review of concepts. *Neuroscience.* 2017; 403: 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.033>
 24. Miri Ashtiani S.N., Daliri M.R., Behnam H. et al. Altered topological properties of brain networks in the early MS patients revealed by cognitive task-related fMRI and graph theory. *Biomed. Signal. Process. Control.* 2018; 40: 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.10.006>
 25. Andersson J.L.R., Hutton C., Ashburner J. et al. Modelling geometric deformations in EPI time series. *NeuroImage.* 2001; 13: 90–919. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0746>
 26. Кремнева Е.И., Сеницын Д.О., Добрынина Л.А., Суслина А.Д., Кротенкова М.В. Функциональная МРТ покоя в неврологии и психиатрии. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2022; 122 (2): 5–14. <https://doi.org/10.17116/jnevro20221220215>
 27. Ashburner J., Friston K.J. Unified segmentation. *NeuroImage.* 2005; 26 (3): 839–851. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.02.018>
 28. Janine B., Smith St.M., Beckmann Ch.F. An introduction to resting state fMRI functional connectivity. Oxford University Press, 2017. 152 p. ISBN: 9780198808220
 29. Jafri M.J., Pearlson G.D., Stevens M., Calhoun V.D. A method for functional network connectivity among spatially independent resting-state components in schizophrenia. *NeuroImage.* 2008; 39 (4): 1666–1681. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.11.001>
 30. Suk J., Hwang S., Cheong S. Functional and Structural Alteration of Default Mode, Executive Control, and Salience Networks in Alcohol Use Disorder. *Front Psychiatry.* 2021; 12: 742228. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2021.742228>
 31. Menon B. Towards a new model of understanding – The triple network, psychopathology and the structure of the mind. *Med. Hypotheses.* 2019; 133: 109385. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109385>
 32. Буккиева Т.А., Поспелова М.Л., Ефимцев А.Ю., Фионик О.В., Алексеева Т.М., Самочерных К.А., Горбунова Е.А., Красникова В.В., Маханова А.М., Левчук А.Г., Труфанов Г.Е. Функциональная МРТ в оценке изменений коннектома головного мозга у пациенток с постмастэктомическим синдромом. *Лучевая диагностика и терапия.* 2021; 4 (12): 41–49. <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-4-41-49>
 33. Гребенщикова Р.В., Ананьева Н.И., Пичиков А.А., Исаков Д.Н., Лукина Л.В. Функциональная связанность структур головного мозга у больных нервной анорексией по данным фМРТ состояния покоя: проспективное исследование. *Лучевая диагностика и терапия.* 2023; 1 (14): 26–36. <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2023-14-1-26-36>
 34. Ублинский М.В., Семенова Н.А., Манжурцев А.В., Меньшиков П.Е., Яковлев А.Н., Ахадов Т.А. Исследование нарушений функциональных связей между сетью пассивного режима работы мозга и структурами мозжечка у пациентов с легкой черепно-мозговой травмой в острой стадии по данным фМРТ состояния покоя. *Медицинская визуализация.* 2020; 24 (2): 131–137. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2020-2-131-137>
 35. Добрынина Л.А., Гаджиева З.Ш., Морозова С.Н., Кремнева Е.И., Кротенкова М.В., Кашина Е.М., Поддубская А.А. Управляющие функции мозга: функциональная магнитно-резонансная томография с использованием теста Струпа и теста серийного счета про себя у здоровых. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2018; 118 (11): 64–71. <https://doi.org/10.17116/jnevro201811811164>
 36. Буккиева Т.А., Чегина Д.С., Ефимцев А.Ю., Левчук А.Г., Исаков Д.К., Соколов А.В., Фокин В.А., Труфанов Г.Е. Функциональная МРТ покоя. Общие вопросы и клиническое применение. *Российский электронный журнал лучевой диагностики.* 2019; 9 (2): 150–170. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-150-170>
 37. Bullmore E., Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nat. Rev. Neurosci.* 2009; 10 (3): 186–198. <https://doi.org/10.1038/nrn2575>



38. Liao X., Vasilakos A.V., He Y. Small-world human brain networks: perspectives and challenges. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017; 77: 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.03.018>
39. Nekovarova T., Fajnerova I., Horacek J., Spaniel F. Bridging disparate symptoms of schizophrenia: a triple network dysfunction theory. *Front Behav Neurosci.* 2014; 8: 171. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2014.00171>

References

1. Craddock R.C., Jbabdi S., Yan C.G. et al. Imaging human connectomes at the macroscale. *Nat Methods.* 2013; 10: 524–539. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2482>
2. Bergmann E., Gofman X., Kavushansky A., Kahn I. Individual Variability in Functional Connectivity Architecture of the Mouse Brain. *Commun. Biol.* 2020; 3: 738. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01472-5>
3. Park H.J., Friston K. Structural and functional brain networks: from connections to cognition. *Science.* 2013; 342: 1238411. <https://doi.org/10.1126/science.1238411>
4. Tarumov D.A., Abdulaev Sh.K., Trufanov A.G. et al. Functional magnetic resonance imaging tomography in assessing the functional state of the brain in patients with opioid addiction. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy.* 2018; 3 (63): 72–79. (In Russian)
5. Biswal B. Resting state fMRI: a personal history. *Neuroimage.* 2012; 62 (2): 938–944. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.01.090>
6. Soddu A., Vanhaudenhuyse A., Demertzi A. et al. Resting state activity in patients with disorders of consciousness. *Funct. Neurol.* 2011; 26: 37–43.
7. Liu Y., Gao J.H., Liotti M. et al. Temporal dissociation of parallel processing in the human subcortical outputs. *Nature.* 1999; 400: 364–367. <https://doi.org/10.1038/22547>
8. Tononi G., Sporns O., Edelman G.M. A measure for brain complexity: relating functional segregation and integration in the nervous system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1994; 91: 5033–5037 <https://doi.org/10.1073/pnas.91.11.5033>
9. Lanting C.P., de Kleine E., Langers D.R., van Dijk P. Unilateral tinnitus: changes in connectivity and response lateralization measured with fMRI. *PLoS One.* 2014; 9: 110704. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110704>
10. Friston K.J. Modalities, modes, and models in functional neuroimaging. *Science.* 2009; 326: 399–403. <https://doi.org/10.1126/science.1174521>
11. Biswal B., Yetkin F.Z., Haughton V.M., Hyde J.S. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn. Reson. Med.* 1995; 34: 537–541. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910340409>
12. Van den Heuvel M.P., Hulshoff Pol H.E. Exploring the brain network: a review on resting-state fMRI functional connectivity. *Eur. Neuropsychopharmacol.* 2010; 20: 519–534. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2010.03.008>
13. Li K., Guo L., Nie J., Li G., Liu T. Review of methods for functional brain connectivity detection using fMRI. *Comput. Med. Imaging Graph.* 2009; 33: 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2008.10.011>
14. Van de Ven V.G., Formisano E., Prvulovic D. Functional connectivity as revealed by spatial independent component analysis of fMRI measurements during rest. *Hum. Brain. Mapp.* 2004; 22: 165–178. <https://doi.org/10.1002/hbm.20022>
15. Beckmann C.F., DeLuca M., Devlin J.T., Smith S.M. Investigations into resting-state connectivity using independent component analysis. *Philos. Trans. R. Soc. Lond B. Bio./Sci.* 2005; 360 (1457): 1001–1013. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1634>
16. Bertolero M.A., Yeo B.T., D'Esposito M. The modular and integrative functional architecture of the human brain. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2015; 112 (49): 6798–6807. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510619112>
17. Ma L., Wang B., Chen X., Xiong J. Detecting functional connectivity in the resting brain: a comparison between ICA and CCA. *Magn. Reson. Imaging.* 2007; 25 (1): 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2006.09.032>
18. Kriegeskorte N., Douglas P.K. Cognitive computational neuroscience. *Nat. Neurosci.* 2018; 21: 1148–1160. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0210-5>
19. Petersen S.E., Sporns O. Brain networks and cognitive architectures. *Neuron.* 2015; 88 (1): 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.027>
20. Bullmore E.T., Bassett D.S. Brain graphs: graphical models of the human brain connectome. *Annu. Rev. Clin. Psychol.* 2011; 7: 113–140. <https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-040510-143934>
21. Van den Heuvel M.P., Sporns O. Network hubs in the human brain. *Trends Cogn. Sci.* 2013; 17 (12): 683–696. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.09>
22. Watts D.J., Strogatz S.H. Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature.* 1998; 393 (6684): 440–442. <https://doi.org/10.1038/30918>
23. Fleischer V., Radetz A., Ciolac D. et al. Graph theoretical framework of brain networks in multiple sclerosis: a review of concepts. *Neuroscience.* 2017; 403: 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.033>
24. Miri Ashtiani S.N., Daliri M.R., Behnam H. et al. Altered topological properties of brain networks in the early MS patients revealed by cognitive task-related fMRI and graph theory. *Biomed. Signal. Process. Control.* 2018; 40: 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.10.006>
25. Andersson J.L.R., Hutton C., Ashburner J. et al. Modelling geometric deformations in EPI time series. *NeuroImage.* 2001; 13: 90–919. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0746>
26. Kremneva E.I., Sinitsyn D.O., Dobrynina L.A. et al. Resting state functional MRI in neurology and psychiatry. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2022; 122(2):5–14. <https://doi.org/10.17116/jnevro20221220215> (In Russian)
27. Ashburner J., Friston K.J. Unified segmentation. *NeuroImage.* 2005; 26 (3): 839–851. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.02.018>
28. Janine B., Smith St.M., Beckmann Ch.F. An introduction to resting state fMRI functional connectivity. Oxford University Press, 2017. 152 p. ISBN: 9780198808220
29. Jafri M.J., Pearlson G.D., Stevens M., Calhoun V.D. A method for functional network connectivity among spatially independent resting-state components in schizophrenia. *Neuroimage.* 2008; 39 (4): 1666–1681. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.11.001>
30. Suk J., Hwang S., Cheong S. Functional and Structural Alteration of Default Mode, Executive Control, and Salience Networks in Alcohol Use Disorder. *Front Psychiatry.* 2021; 12: 742228. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2021.742228>
31. Menon B. Towards a new model of understanding – The triple network, psychopathology and the structure of the



- mind. *Med. Hypotheses*. 2019; 133: 109385. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109385>
32. Bukkieva T.A., Pospelova M.L., Efimtsev A.Yu. et al. Functional MRI in the assessment of changes in the brain connectome in patients with post-mastectomy syndrome. *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2021; 4 (12): 41–49. <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-4-41-49> (In Russian)
33. Grebenshchikova R.V., Ananyeva N.I., Pichikov A.A. et al. Functional connectivity of brain structures in patients with anorexia nervosa based on resting state fMRI: prospective study. *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2023; 1 (14): 26–36. <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2023-14-1-26-36> (In Russian)
34. Ublinskiy M.V., Semenova N.A., Manzhurtsev A.V. et al. Dysfunction of cerebellum functional connectivity between default mode network and cerebellar structures in patients with mild traumatic brain injury in acute stage. rsfMRI study. *Medical Visualization*. 2020; 24 (2): 131–137. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2020-2-131-137> (In Russian)
35. Dobrynina L.A., Gadzhieva Z.Sh., Morozova S.N. et al. Executive functions: fMRI of healthy volunteers during Stroop test and the serial count test. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2018; 118 (11): 64–71. <https://doi.org/10.17116/jnevro201811811164> (In Russian)
36. Bukkieva T.A., Chegina D.S., Efimtsev A.Yu. et al. Resting state functional MRI. General issues and clinical application. *REJR*. 2019; 9 (2): 150–170. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-150-170> (In Russian)
37. Bullmore E., Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nat. Rev. Neurosci.* 2009; 10 (3): 186–198. <https://doi.org/10.1038/nrn2575>
38. Liao X., Vasilakos A.V., He Y. Small-world human brain networks: perspectives and challenges. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017; 77: 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.03.018>
39. Nekovarova T., Fajnerova I., Horacek J., Spaniel F. Bridging disparate symptoms of schizophrenia: a triple network dysfunction theory. *Front Behav Neurosci.* 2014; 8: 171. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2014.00171>

Для корреспонденции*: Абдулаев Шамиль Казимагомедович – e-mail: a.shamil94@gmail.com

Абдулаев Шамиль Казимагомедович – научный сотрудник ФГБОУ ВО “Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова” Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-5126-4212>

Тарумов Дмитрий Андреевич – доктор мед. наук, преподаватель первой кафедры терапии усовершенствования врачей ФГБОУ ВО “Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова” Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-9874-5523>

Богдановская Анна Сергеевна – ординатор кафедры психиатрии и наркологии ФГБОУ ВО “Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0009-0002-2656-9070>

Contact*: Shamil K. Abdulaev – e-mail: a.shamil94@gmail.com

Shamil K. Abdulaev – researcher of S.M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-5126-4212>

Dmitriy A. Tarumov– Doct. of Sci. (Med.), Lecturer of the 1st Department (Advanced therapy for doctors), Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-9874-5523>

Anna S. Bogdanovskaya – Resident, Department of Psychiatry and Narcology, I.I. Mechnikov North-Western State Medical University St. Petersburg. <https://orcid.org/0009-0002-2656-9070>